УДК 621.315.615.2:537.571

О постоянстве удельного газовыделения (газопоглощения) изоляционного масла в ионизированной среде

Канд. техн. наук Д. С. ВАРШАВСКИЙ

Усть-Каменогорский строительно-дорожный институт

Срок службы τ бумажно-масляной изоляции при длительном приложении переменного напряжения, определяющийся при прочих равных условиях интенсивностью ионизационного старения масла, существенно зависит от напряженности электрического поля E в соответствии со следующим выражением, полученным вначале эмпирически [Л. 1—3], а затем подтвержденным теоретически [Л. 4—8]:

$$\tau = A_1 E^{-n_1}, \qquad (1)$$

где A_1 и n_1 — коэффициенты, которые могут значительно изменяться в зависимости от вида и качества пропитывающего вещества, сорта и объемного веса бумаги, толщины диэлектрика и т. д. [Л. 3]. При исследованиях на бумажно-масляных конденсаторах нами получено $n = 3{,}5 \div 8$ [Л. 2 и 3]; более низкие значения n получены для больших толщин диэлектрика.

Все упомянутые экспериментальные и теоретические исследования [Л. 1—8] производились для так называемых негазостойких или газовыделяющих [Л. 3 и 9] масел. При использовании таких масел срок службы бумажно-масляной изоляции практически ограничен временем перенасыщения масла газом, образующимся в результате ионизации, т. е. временем начала свободного газовыделения из масла.

Поэтому для предопределения срока службы бумажно-масляной изоляции при ионизационном старении было предложено [Л. 5] пользоваться постоянной, характеризующей количество газа в кубических сантиметрах, выделенное маслом при затрате энергии ионизации 1 *дж*. С учетом этой постоянной (обозначим ее K) была теоретически доказана справедливость выражения (1) [Л. 5], причем величина K учитывалась коэффициентом A_1.

Систематическое изучение факторов, влияющих на величину K, не проводилось, и она принималась постоянной [Л. 6 и 7]. Однако уже предварительные рассуждения и анализ последних опубликованных данных показывают, что величина K не может быть во всех случаях принята постоянной.

Известно, что в зависимости от химического состава масло при прочих равных условиях может быть как негазостойким или газовыделяющим, так и газостойким или газопоглощающим [Л. 3 и 9]. Негазостойкие масла на начальных стадиях воздействия ионизации также могут поглощать газ [Л. 3 и 9]. Если масло в данных условиях является газостойким, то оно не будет насыщаться газом, а наоборот дегазироваться. В этих условиях пользоваться величиной K в соответствии с приведенным определением не имеет смысла; необходимо учитывать не газовыделение масла, а газопоглощение. После израсходования газопоглощающего компонента масло снова начнет выделять газ.

Для товарного конденсаторного масла опубликованы существенно отличающиеся величины K, а именно $5 \cdot 10^{-4}$ [Л. 5] и $6 \cdot 10^{-3}$ *см*^{3}/*дж* [Л. 7]; имеются указания, что K возрастает с изменением характера разряда от тихого к коронному и далее к дуговому от 10^{-4} до 10^{-1} *см*^{3}/*дж* [Л. 10].

Из изложенного вытекает актуальность исследования влияния на величину K наиболее существенных факторов. Некоторые результаты проделанной в этом направлении работы приведены ниже.

Условимся называть величину K удельным газовыделением и считать ее положительной или удельным газопоглощением и считать ее отрицательной, если в данных условиях масло не выделяет, а поглощает газ.

Обычно величина K определяется на образцах бумажно-масляной изоляции [Л. 5]. Однако, помимо этого метода, решено было воспользоваться также аппаратурой для испытания масел на газостойкость, что более просто и удобно, и определять величину K по количеству выделенного или поглощенного газа на основе непосредственного измерения потерь на ионизации [Л. 5] в первом случае и по методике [Л. 15] — во втором.

На основе сравнительной оценки различной аппаратуры для испытания масел на газостойкость пришлось отказаться от применения реактора с коронирующим электродом и остановиться на реакторе с ионизированным газовым зазором, заключенным между двумя слоями твердого диэлектрика [Л. 11 и 12]. В реакторе газовая и жидкая фазы располагаются параллельно; поскольку ионизирована первая, то интенсивность ее ионизации практически не изменяется при испытании различных масел. Во всех таких случаях получается одна и та же зависимость интенсивности (мощности) ионизации от напряженности электрического поля (рис. 1) или других влияющих факторов. При этом характер получаемых зависимостей соответствовал их характеру в случае бумажно-масляного диэлектрика. Это, например, видно из данных на рис. 1, где сопоставлена зависимость интенсивности ионизации в относительных единицах от средней напряженности электрического поля E в газовой фазе реактора (кривая *1*) с наиболее характерной [Л. 8] зависимостью для бумажно-масляного конденсатор-

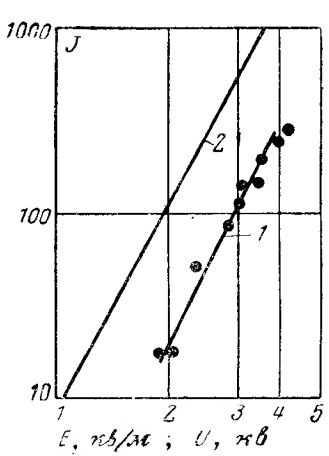


Рис. 1. Зависимость интенсивности ионизации J в относительных единицах от средней напряженности электрического поля E в газовой фазе реактора (*1*) и от напряжения U, приложенного к бумажно-масляной изоляции *2*.

ного диэлектрика (кривая 2). В обоих случаях характер влияния E оказывается одним и тем же:

$$J = A_2 E^{n_2}. \qquad (2)$$

В данном конкретном случае для обоих зависимостей $n_2 \approx 4$.

Ионизационное разложение масла в современной бумажно-масляной изоляции обычно начинается в условиях наличия в масле большого или меньшего количества растворенного воздуха. Исходя из этого, испытания конденсаторных масел на газостойкость проводят в исходной атмосфере воздуха [Л. 9] при полном насыщении воздухом испытуемого масла перед началом испытания. Из данных на рис. 2 видно, что по мере насыщения масла воздухом характер влияния E на срок службы бумажно-масляной изоляции не изменяется и соответствует характеру влияния E на время до начала газовыделения соответствующего масла при испытании в аппаратуре. Для всех зависимостей на рис. 2 справедливо выражение (1) при $n_1 = 4$. Следовательно, насыщение масла воздухом в реакторе перед началом испытания не оказывает заметного влияния на характер его поведения в ионизированной среде по сравнению с бумажно-масляной изоляцией.

При испытании масел в реакторе изменение давления практически не оказывало влияния на интенсивность (мощность) ионизации в газовой фазе при средних напряженностях электрического поля в газовом разрядном зазоре менее 3,6 *кв/мм*. При дальнейших исследованиях эта величина не превышалась.

Применение выбранного реактора обеспечивало возможность длительной работы в условиях хорошо воспроизводимой ионизации постоянной интенсивности, что трудно осуществить на реальной бумажно-масляной изоляции.

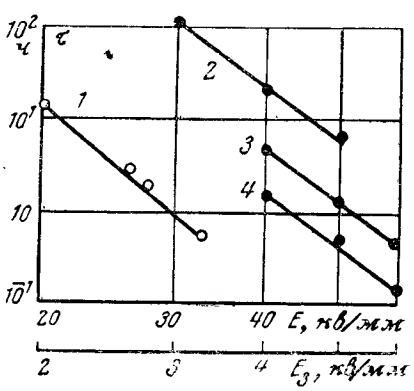


Рис. 2. Влияние напряженности электрического поля E_3 в разрядном зазоре реактора на время до начала газовыделения τ из негазостойкого масла при испытаниях в реакторе и испытательной напряженности E на средний срок службы (вероятность пробоя 0,5) пропитанных этим маслом бумажно-масляных конденсаторов.

1 — время от начала газовыделения масла (в исходном состоянии масло насыщено воздухом в количестве 10% по объему); *2* — средний срок службы бумажно-масляных конденсаторов; исходное воздухосодержание в масле 0,6%; *3* — то же, исходное воздухосодержание в масле 4%; *4* — то же, масло насыщено воздухом (около 10% по объему).

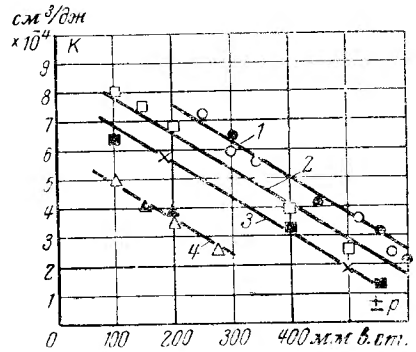


Рис. 3. Влияние избыточного давления ($+p$) или вакуума ($-p$) на удельное газовыделение ($+K$ для $+p$) или газопоглощение ($-K$ для $-p$) масла под воздействием ионизации при 80° С и частоте 50 *гц* в бумажно-масляном диэлектрике и 50—100 *гц* в реакторе.

1 — деароматизированное газовыделяющее масло из сернистых восточных нефтей ($+K$); *2* — высокоароматизированное газопоглощающее масло из сернистых восточных нефтей ($-K$), содержащее 32% ароматических углеводородов; испытание в реакторе; *3* — товарное конденсаторное масло ($+K$); *4* — масло из сернистых восточных нефтей, содержащее 16,7% ароматических углеводородов ($-K$). Испытания: ○, ×, △ — в реакторе; ●, ■, ▲ — на бумажно-масляных образцах.

Первые же опыты по определению величины K как в герметичных образцах бумажно-масляной изоляции, так и в реакторе выявили для всех испытанных масел существенную зависимость величины K от продолжительности воздействия ионизации. Проанализируем причины этой зависимости.

Вначале рассмотрим особенности поведения масла в атмосфере ионизированного воздуха. Все масла в начальный период воздействия ионизации поглощают газ [Л. 9] вследствие окисления кислородом воздуха. Интенсивность этого газопоглощения определяется химическим составом масла, а его продолжительность зависит от количества остаточного кислорода. После связывания оставшегося кислорода превалируют реакции, характерные для поведения масел в ионизированном азоте (абсолютное большинство масел при этом с большой интенсивностью выделяет газ). Затем наступают реакции, характерные для поведения масел в ионизированном водороде, из которого в конечном итоге практически состоит вся газовая атмосфера уже в конце второго периода поведения масла. В большинстве случаев, начиная с этого момента, выявляется газопоглощающий или газовыделяющий характер дальнейшего поведения масла.

Следовательно, по мере чередования упомянутых трех стадий значение K изменяется не только по величине, но и по знаку.

Наблюдалось также изменение K со временем испытания и в том случае, когда одна из упомянутых стадий, например третья, четко сформируется. Как видно из рис. 3, причиной этого является изменение давления внутри реактора или бумажно-масляных образцов. Параллельность зависимостей на рис. 3 свидетельствует о том, что характер влияния давления одинаков для различных масел.

Важно отметить, что повышение избыточного давления приводит к снижению абсолютной величины K и для газопоглощающих масел, причем соответствующие зависимости как с ростом избыточ-

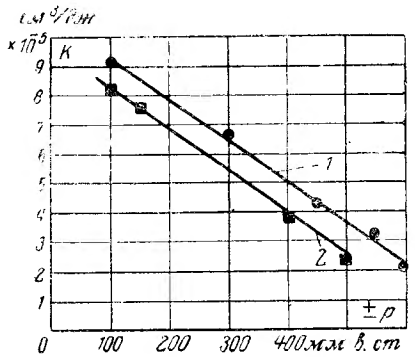


Рис. 4. Влияние избыточного давления ($+p$) или вакуума ($-p$) на удельное газовыделение ($+K$ для $+p$) или газопоглощение ($-K$ для $-p$) масла под воздействием ионизации при 80° С и частоте 1 000 *гц*.

1 — деароматизированное газовыделяющее масло ($+K$); *2* — высокоароматизированное газопоглощающее масло ($-K$).

ного давления $+p$, так и вакуума $-p$ практически совпадают.

В рассматриваемых условиях в маслах одновременно протекают различные реакции, в первую очередь, гидрогенизации и дегидрогенизации. У высокоароматизированных масел преобладают первые, а для деароматизированных характерны вторые. Однако в обоих случаях имеет место динамическое равновесие между скоростью каждого из этих процессов в отдельности и скоростью обратных процессов, носящих рекомбинационный характер.

По мере увеличения количества ионизированных продуктов разложения масла скорость рекомбинационного процесса должна увеличиваться, а результирующая скорость дегидрогенизации — снижаться. У высокоароматизированных масел, наоборот, протекание реакций гидрогенизации приводит к обеднению реакционного пространства ионизированными продуктами разложения масла, а следовательно, и к снижению скорости гидрогенизации.

При изменении энергии ионизированных частиц возможно изменение динамического равновесия между скоростями упомянутых процессов, а соответственно и характера результирующего процесса их проявления.

Если сказанное справедливо, то как увеличение давления в реакторе, так и его снижение, которые происходят за счет увеличения количества газообразных продуктов разложения масла у малоароматизированных масел и его уменьшения у высокоароматизированных масел, должны приводить к снижению величины K этих масел, что и имеет место в действительности.

Увеличение частоты и соответствующий рост мощности ионизации, с одной стороны, приводят к увеличению скорости гидрогенизации или дегидрогенизации, но, с другой стороны, за счет соответствующего изменения количества ионизированных продуктов разложения масла — к снижению их скорости. В результате величина K должна снизиться, что и подтверждается данными на рис. 3 и 4. Как видно из этих данных, у масел *1* и *2* при частоте 1 000 *гц* величина K снизилась на порядок, а характер ее зависимости от давления остался без изменения.

Как видно из рис. 5, с ростом E, а следовательно, и энергии ионизированных частиц как у газостойких, так и у негазостойких масел абсолютная величина K снижается.

Необходимо отметить, что приведенные на рис. 5 величины K относятся к различным из упомянутых характерных стадий протекания реакций в ионизированной среде, так как при низких значениях E из-за общего снижения скорости реакций последняя, третья стадия не успевает сформироваться за время испытаний.

Сказанное иллюстрируется данными таблицы.

Отрицательная величина K в газовыделяющей области у среднегазостойкого масла означает, что масло настолько интенсивно выделяло газ на предыдущей стадии, что в аппаратуре создалось избыточное давление. На третьей стадии масло поглощает газ и избыточное давление постепенно снижается. Если продолжить опыт дальше, то знак K не изменится и над поверхностью масла появится разрежение.

Величина $K \cdot 10^4$, *см³/дж*, для различных стадий протекания реакций

Тип масла	E, *кв/мм*	Стадия поведения масла в атмосфере ионизированного воздуха		
		вторая	третья	
		газопоглощение	газовыделение	газопоглощение
Деароматизированное газовыделяющее масло	1,97	15,7	—	—
	2,6	—	2,32*	—
	3,3		2,42*	—
Масло средней газостойкости	1,97	11,15	—	—
	2,6	—	—1,9	—
	3,3	—	1,13	—
Высокоароматизированное газопоглощающее масло	1,97	17	—	—
	2,6	—	—	—2,48**
	3,3	—	—	—2,44**

* Приведено к избыточному давлению 500 *мм в. ст.*
** Приведено к вакууму 500 *мм в. ст.*

Приведенные в таблице величины K, соответствующие различным стадиям процесса, существенно различаются между собой у одних и тех же масел.

Давление в зоне реакции у газовыделяющих масел непрерывно возрастает, а у газопоглощающих — непрерывно снижается. В том и другом (при наличии разрежения) случаях абсолютная величина K снижается. Если в пределах одной характерной

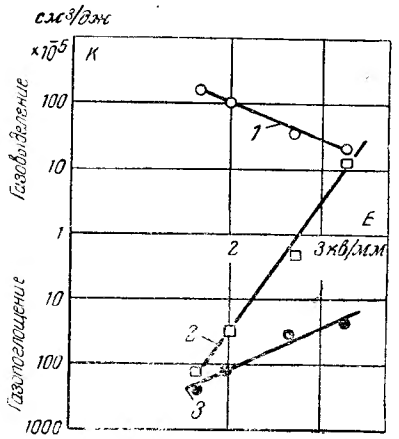


Рис. 5. Влияние средней напряженности электрического поля E в газовом зазоре реактора на величину K при температуре 80° С и частоте переменного тока 1 000 *гц* для одной и той же продолжительности испытания в реакторе.

1 — негазостойкое деароматизированное масло; *2* — масло средней газостойкости; *3* — высокоароматизированное газостойкое масло (C_A = 32%).

стадии поведения масла привести величины K к одному и тому же давлению, то, как видно из таблицы, величины K в этих условиях оказываются практически одинаковыми для различных значений E.

Правда, в реальных условиях значение p не остается постоянной, а следовательно, соответственно изменяется и величина K. Больше того, газостойкое вначале масло может стать негазостойким. Поэтому для более надежной оценки влияния E на срок службы бумажно-масляной изоляции желательно одновременно учитывать степень и характер изменения величины K.

Как видно из рис. 5, характер влияния E на величину K, как и на τ и J в выражениях (1) и (2), носит степенной характер. Для негазостойкого масла справедливо выражение, подобное (1), полученное для бумажно-масляного диэлектрика, пропитанного негазостойким маслом. В данном случае $n_1=3{,}3$. Для масел *2* и *3* на рис. 5 справедливо выражение, подобное (2) при $n_2=10{,}5$ и 3,5 соответственно. Таким образом, для негазостойких масел имеем:

$$K=A_3E^{-n_1}, \qquad (3)$$

а для газостойких:

$$K=A_4E^{n_2}. \qquad (4)$$

Зависимость *1* на рис. 6 показывает влияние изменения химического состава масел из сернистой Туймазинской нефти на величину K при испытании в реакторе при 80° С, 2,6 *кв/мм*, 100 *гц*, а при испытании на бумажно-масляных образцах — при 60° С, 55 *кв/мм*, 50 *гц* и прочих равных условиях. Испытанные масла, отличавшиеся практически только содержанием ароматических углеводородов C_A по Ватерману и Корнелиссену [Л. 13], были изготовлены Уфимским нефтяным институтом и Ново-Уфимским нефтеперерабатывающим заводом под руководством Н. Г. Калантара.

Данные на рис. 6 подтверждают, что газопоглощение масел определяется содержанием ароматических углеводородов. Но из него также следует, что по мере расходования ароматических углеводородов величина K не будет оставаться постоянной, а возрастать у газопоглощающих масел. Казалось бы, что определение величины K и характера ее изменения под влиянием изменения окружающих условий позволит достаточно надежно предопределять срок службы бумажно-масляной изоляции. Конечно, при этом выражение (1) будет справедливо для газопоглощающих масел только после израсходования газопоглощающих компонент и начала газовыделения.

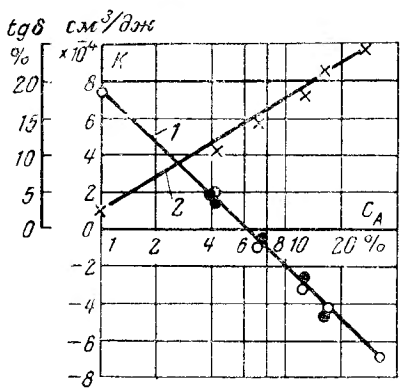
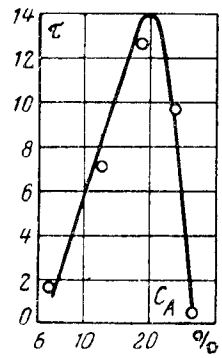


Рис. 6. Влияние C_A на величину K (кривая *1*) и конечное значение tg δ (кривая *2*) масел при испытании в ионизированной среде.

○ — испытание масла в реакторе; ● — испытание бумажно-масляных образцов.

Рис. 7. Зависимость срока службы в относительных единицах бумажно-масляного диэлектрика, пропитанного маслами, для которых получена зависимость *1* на рис. 6, от C_A.

Площадь обкладки 40 *см*², $E_{эфф}$ = =55 *кв/мм*, f=50 *гц*. Минимальный срок службы, соответствующий вероятности выхода из строя, 0,05.



Однако срок службы зависит не только от величины K, но и от изменения других характеристик масла и прежде всего электрических, а приведенные данные этого не учитывают.

Реакции полимеризации и поликонденсации, протекающие в масле под воздействием ионизированных частиц, влияют не только на величину K, но и на электрические характеристики масла, в том числе и на величину его tg δ [Л. 3, 11 и 14]. Увеличение tg δ масла не может не влиять на срок службы бумажно-масляного диэлектрика в первую очередь за счет соответствующего роста его температуры.

Как видно из рис. 7, по мере улучшения K с увеличением C_A срок службы возрастает лишь до определенной границы, за пределами которой, несмотря на увеличение удельного газопоглощения масла, срок службы снижается. Основной причиной этого снижения является недопустимый рост tg δ масла, тем больший, чем выше содержание в масле ароматических углеводородов [Л. 11]. Соответствующая зависимость tg δ при 100° С и 50 *гц* для рассматриваемых масел характеризуется данными рис. 6.

Из рис. 6 и 7 видно, что, начиная с определенной величины C_A в масле, ухудшение его tg δ при ионизационном старении оказывает преобладающее влияние на срок службы бумажно-масляной изоляции по сравнению с благоприятным влиянием увеличения газопоглощения.

Следовательно, при оценке срока службы по выражению (1) в величине коэффициента A_1 необходимо, помимо величины K и характера ее изменения, учитывать степень увеличения tg δ масла при ионизационном старении.

Выводы. 1. Величины удельного газовыделения (газопоглощения) масел не являются постоянными.

2. Изучены некоторые закономерности изменения величин удельного газовыделения (газопоглощения) при ионизационном старении.

3. Для более надежной оценки срока службы бумажно-масляной изоляции необходимо учитывать не только величину удельного газовыделения (газопоглощения) масла, но и стабильность его tg δ.

Литература

1. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., Разработка низковольтных бумажных конденсаторов, Известия электропромышленности слабого тока, 1937, № 5, 6 и 7.

2. Варшавский Д. С., К вопросу об электрической прочности многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги при длительном приложении напряжения частотой 50 *гц*. Известия вузов, «Энергетика», 1964, № 1.

3. Варшавский Д. С., Пути повышения качества силовых конденсаторов, ЦИНИТИэлектропром, 1963.

4. Veith H., Zur Temperatur- und Spannungsabhängigheit der Lebensdauer elektrischer Kondensatoren, Frequenz, 1958, Bd. 12, № 11.

5. Грейсух М. А., Кучинский Г. С., Каплан Д. А. и Мессерман Г. Т., Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях, Госэнергоиздат, 1963.

6. Пинталь Ю. С., Ионизационные характеристики и старение бумажно-масляной конденсаторной изоляции, «Электротехника», 1965, № 1.

7. Кучинский Г. С., Частичные разряды и срок службы высоковольтной бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа, Автореферат докторской диссертации, ЛПИ им. М. И. Калинина, Л., 1965.

8. Кучинский Г. С., Каплан Д. А., Пинталь Ю. С., Переселенцев И. Ф., Медведев С. К., Мессерман Г. Т. и Манн А. К., Ионизационные процессы и срок службы конденсаторной изоляции, СИГРЭ, 1966, докл. № 137.

9. Варшавский Д. С., Масло для силовых бумажных конденсаторов, Научно-технический информационный бюллетень ЛПИ им. М. И Калинина, 1958, № 7.

10. Dakin T. W., Sloat T. K., Gasgeneration and its relation to the dielectric strength of Oil, Electr. Insulat. Conf. Mater. and Applic. 5-th Conf. Chicago, 1963.

11. Варшавский Д. С. и Калантар Н. Г., Испытание изоляционного масла в ионизированной атмосфере, Электротехническая промышленность, 1966, № 269.

12. Калантар Н. Г. и Глазунов В. И., Методика испытания газостойкости изоляционных масел, «Электротехника», 1966, № 12.

13. Cornellissen, Watermann H., Gourn. Inst. Petr., 1957, vol. 43, № 398, p. 47.

14. Варшавский Д. С., Некоторые вопросы восстановления конденсаторов для повышения коэффициента мощности, «Промышленная энергетика», 1960, № 11.

15. Варшавский Д. С., Метод оценки удельного газовыделения масел, «Электротехническая промышленность», вып. 280, 1967.

[23.2.1967]

✧ ✧ ✧

УДК 621.319.4:621.315.614.6:621.315.616.9

Силовые конденсаторы с комбинированным диэлектриком

Доктор техн. наук, проф. В. Т. РЕННЕ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В конденсаторах для электронной техники применяются разнообразные твердые диэлектрики как органические, так и неорганические, а также сжатый газ, воздух и вакуум. В силовых же конденсаторах, используемых в электроэнергетике при технической частоте, до самого последнего времени монопольно применялся лишь один вид диэлектрика — пропитанная бумага.

Бумажный диэлектрик силового конденсатора в течение нескольких последних десятилетий подвергался постепенной модернизации путем совершенствования пропиточных жидкостей, повышения качества бумаги и улучшения технологии и конструкции. На рис. 1 представлены результаты работ по улучшению характеристик бумажных силовых конденсаторов в США за период с 1924 по 1960 г., характеризующие систематическое снижение веса, рассчитанного на 1 *квар*, и возрастание удельной мощности, рассчитанной на единицу объема конденсаторов.

Большую роль в улучшении удельных характеристик конденсаторов сыграла замена масла, применявшегося ранее для пропитки силовых конденсаторов, хлорированным дифенилом, обладающим повышенной диэлектрической проницаемостью и резко улучшенной стабильностью в переменном электрическом поле, а также повышенной стойкостью к окислению при повышенных температурах. Переход от пропитки маслом к пропитке этой полярной жидкостью при сохранении толщины диэлектрика и величины рабочей напряженности поля уже дает повышение емкости и реактивной мощности конденсатора примерно в 1,5 раза. В связи с этим при таком переходе номинальная мощность единичного конденсатора была сразу повышена с 10 до 15 *квар*. В дальнейшем была показана возможность повышения рабочей напряженности с учетом повышенной устойчивости хлорированного дифенила при воздействии поля и температуры, что позволило провести дополнительное улучшение удельных характеристик. Постепенное улучшение качества бумаги (рис. 2) дало возможность уменьшить потери в конденсаторе и ослабить их зависимость от температуры, т. е. улучшить тепловую устойчивость конденсатора. Это обстоятельство привело к возможности дальнейшего увеличения мощности в единице до 25, 50 и, наконец, до 100 *квар*.

Если ранее для бумажно-масляного диэлектрика применялись значения рабочей напряженности порядка 12—13 *кв/мм*, то при использовании новых сортов хлорированного дифенила и специальных сортов бумаги с пониженными потерями оказалось возможным использовать значения напряженности поля до 18—20 *кв/мм*. Следует отметить, что при этом требуется и соответствующее улучшение технологии и прежде всего переход на сушку и пропитку конденсаторов при остаточных давлениях порядка 10^{-3}—10^{-4} *мм рт. ст.* [Л. 1].

Отечественная промышленность при использовании бумаги, пропитанной маслом, сумела добиться получения максимальной мощности в единице до 50 *квар*. Из таких конденсаторов, в частности, была собрана уникальная батарея продольной компен-

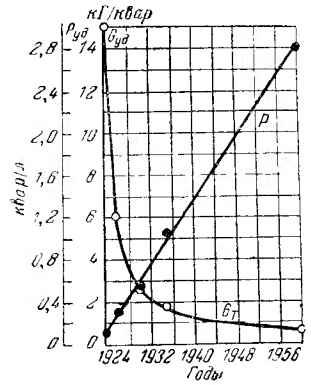


Рис. 1. Улучшение удельных характеристик силовых конденсаторов в США.

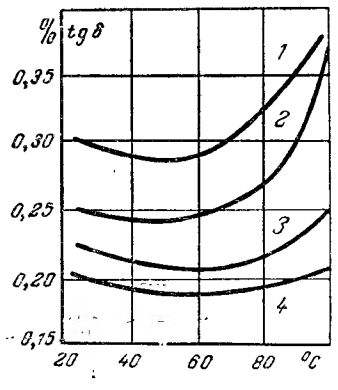


Рис. 2. Улучшение качества конденсаторной бумаги в США.

1 — 1940 г.; *2* — 1943÷1950; *3* — 1955÷1958; *4* — 1958÷1963 гг. Потери указаны для конденсаторов, пропитанных хлордифенилом.

сации на линии электропередачи Куйбышев—Москва, мощностью 500 000 *квар* [Л. 2].

Современные бумажные силовые конденсаторы, выпускаемые передовыми фирмами как в США, так и в Западной Европе, имеют максимальную мощность в единице 100 *квар* и удельные характеристики порядка 2,5—3,5 *квар/л* и 0,5—0,75 *кг/квар* [Л. 3]. Такие характеристики можно получать, используя специальные сорта хлорированных масс, бумагу с малыми диэлектрическими потерями и пониженной плотностью, лишенную поверхностных загрязнений фольгу и высокий вакуум при сушке и пропитке конденсаторов. Нижний предел потерь в таких конденсаторах составляет порядка 0,2%. Такая величина потерь ограничивает возможность дальнейшего повышения единичной мощности конденсатора, так как при этом создается угроза потери его тепловой устойчивости.

Вместе с тем увеличение мощности отдельных конденсаторов представляет большой интерес в связи с возрастанием потребности в конденсаторных батареях с высокой реактивной мощностью, особенно в условиях Советского Союза, когда существует необходимость передачи больших количеств энергии на весьма значительные расстояния. В этих условиях мощные конденсаторные батареи требуются как на линиях передачи энергии переменным током, так и на линиях постоянного тока. Комплектация таких батарей из единичных конденсаторов мощностью 50 и даже 100 *квар* оказывается затруднительной.

Однако дальнейшее значительное снижение потерь в диэлектрике конденсатора теми же путями, которые использовались до последнего времени, мало перспективно. Приходится искать новые пути для решения этой проблемы. Одним из таких путей является замена бумажного диэлектрика комбинированным из бумаги и неполярной синтетической пленки. Основными преимуществами комбинированного диэлектрика по сравнению с чисто пленочным в данном случае являются: снижение стоимости, поскольку часть объема диэлектрика заполняется бумагой, стоимость которой обычно ниже стоимости синтетической пленки, особенно при малой ее толщине, и повышение электрической прочности. Последнее объясняется тем, что синтетические пленки плохо смачиваются пропитывающими жидкостями; при этом трудно добиться достаточно полной пропитки конденсаторных секций, особенно при большой ширине пленки, даже в условиях пропитки при глубоком вакууме. Применение бумажных прокладок между слоями пленки (и между пленкой и фольгой, служащей обкладкой), резко улучшает качество пропитки; в такой конструкции бумажные прокладки работают в качестве «фитилей», всасывающих пропиточную массу в глубь намотанной секции.

Преимуществами комбинированного диэлектрика по сравнению с чисто бумажным (при использовании неполярной пленки с малым углом потерь) являются: снижение общих потерь в диэлектрике, позволяющее повысить номинальную реактивную мощность единичного конденсатора, и возможность повысить рабочую напряженность поля в связи с повышением электрической прочности такого диэлектрика, что позволяет добиваться дополнительного улучшения удельных характеристик конденсатора.

Порядок значений диэлектрической проницаемости и угла потерь комбинированного диэлектрика, исходя из значений этих характеристик для пропитанной бумаги и неполярной пленки и выбранного соотношения между их толщинами, можно определить по приведенным ниже формулам, полученным при рассмотрении последовательного включения емкостей, созданных бумагой и пленкой [Л. 4]:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_б \varepsilon_п}{\varepsilon_б x + \varepsilon_п (1 - x)}; \qquad (1)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_б}{1 + \frac{\varepsilon_б x}{\varepsilon_п (1 - x)}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п (1 - x)}{\varepsilon_б x}}. \qquad (2)$$

В этих формулах индекс «б» относится к бумаге, индекс «п» — к пленке и величина «*x*» обозначает отношение толщины пленки к общей толщине комбинированного диэлектрика. Принимая для предварительного расчета значения: $\varepsilon_б = 5$, $\varepsilon_п = 2$, $\operatorname{tg}\delta_б = 20 \cdot 10^{-4}$ и $\operatorname{tg}\delta_п = 5 \cdot 10^{-4}$, получаем зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь комбинированного диэлектрика от относительного содержания пленки в этом диэлектрике *x*, приведенного на рис. 3.

Данные рис. 3 показывают, что если половина толщины диэлектрика приходится на долю неполярной пленки, то величина угла потерь уменьшается примерно вдвое, при снижении диэлектрической проницаемости примерно на 40%. Однако снижение последней можно компенсировать соответствующим уменьшением общей толщины диэлектрика, поскольку переход к комбинированному диэлектрику, как уже указано выше, позволяет повысить напряженность электрического поля. При этом можно даже ожидать дополнительного снижения удельного объема конденсатора. Принимая, что удельный объем силового конденсатора в первом приближении обратно пропорционален произведению диэлектрической проницаемости и квадрата напряженности поля и обозначая через *k* отношение удельного объема бумажного конденсатора к удельному объ-

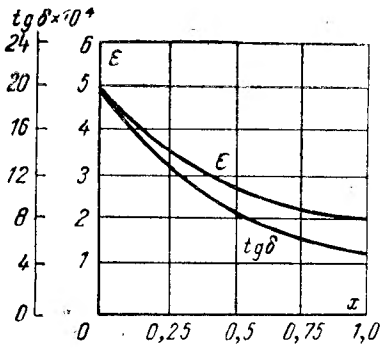


Рис. 3. Зависимость ε и tg δ комбинированного диэлектрика от отношения x толщины неполярной пленки к общей толщине.

ему конденсатора с комбинированным диэлектриком, получаем отношение напряженности поля в комбинированном диэлектрике к напряженности поля в чистобумажном диэлектрике, обеспечивающее заданное отношение удельных объемов k:

$$\frac{E_к}{E_б} = \sqrt{k\frac{\varepsilon_б}{\varepsilon_к}}. \qquad (3)$$

На рис. 4 показана зависимость отношения $E_k/E_б$, вычисленного по этой формуле для пределов значения k от 1 до 2; при расчете приняты значения $\varepsilon_б=5$ и $\varepsilon_k=2{,}86$, что на рис. 3 соответствует равным значениям толщины бумаги и пленки в комбинированном диэлектрике ($x=0{,}5$). Данные на рис. 4 позволяют заключить, что для сохранения удельного объема комбинированного конденсатора на том же уровне, который имеет бумажный конденсатор (несмотря на снижение ε_k), необходимо повысить напряженность поля примерно на 30%; для снижения объема в 1,5 раза надо повысить E_k на 60% и для снижения объема в 2 раза необходимо повысить E_k на 87%, т. е. почти в 2 раза.

В какой степени возможно повышать напряженность поля в комбинированном диэлектрике по сравнению с чистобумажным при длительном воздействии напряжения технической частоты должны дать ответ соответствующие опыты.

Следует отметить, что независимо от суммарной толщины диэлектрика и соотношения в ней толщин бумаги и неполярной пленки отношение напряженностей в бумажной и пленочной составляющей комбинированного диэлектрика определяется только обратным соотношением их диэлектрических проницаемостей, причем благодаря меньшему значению $\varepsilon_п$ по сравнению с бумагой пленка всегда будет работать при повышенной напряженности. Действительно:

$$\left.\begin{aligned} \frac{U_п}{U_б} &= \frac{E_п d_п}{E_б d_б} = \frac{C_б}{C_п} = \frac{\varepsilon_б/d_б}{\varepsilon_п/d_п}, \\ \frac{E_п}{E_б} &= \frac{\varepsilon_б d_п}{\varepsilon_п d_б} : \frac{d_п}{d_б} = \frac{\varepsilon_б}{\varepsilon_п}. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

По недавно полученным сведениям [Л. 5] фирма Дженерал Электрик (США) уже приступила к выпуску силовых конденсаторов с комбинированным диэлектриком на рабочие напряжения 7 200, 7 640 и 7 960 *в* и с номинальной мощностью в единице 400 *квар*. Размеры корпуса такого конденсатора 204×254×1 320 *мм*, что дает объем конденсатора 68,5 *л*; это соответствует удельной реактивной мощности 400/68,5=5,85 *квар/л*.

Сравнивая это значение с указанными выше цифрами 2,5—3,5 *квар/л*, можно рассматривать его как резкий качественный скачок в связи с принципиальным изменением состава диэлектрика. Потери в новых конденсаторах составляют менее 0,1%, т. е. примерно в 2 раза снижены по сравнению с потерями для бумажных конденсаторов современного типа. Стоимость конденсаторов указана равной 800 *долл* на штуку, что дает стоимость одного *квар*, равную 2 *долл*. Фирма отмечает, что стоимость конденсатора, мощностью 400 *ква*, на 250—300 *долл* дешевле четырех бумажных конденсаторов мощностью по 100 *квар*. О составе комбинированного диэлектрика, названного фирмой «Магнавар», никаких сведений не приводится. Можно только заключить, что судя по полученному снижению угла потерь, использована комбинация из бумаги и неполярной синтетической пленки.

Об этих интересных конденсаторах уже сообщалось в нашей печати [Л. 6], но не была подчеркнута принципиальная новизна комбинированной системы диэлектрика в силовых конденсаторах и была допущена ошибка в указании их размеров, но позволяющая правильно оценить их удельные характеристики. По последним сведениям [Л. 7] разработка силового конденсатора с комбинированным бумажно-пленочным диэлектриком выполнена также в Италии фирмой ИКАР при консультации профессора Болонского университета Д. Дзанобетти. Об итогах этой работы был сделан доклад на заседании Комитета 18 СИГРЭ, происходившем в Кракове в июле 1967 г.

Сообщается, что в этом конденсаторе использована пленка изотактического полипропилена, обладающая при толщине 25 *мк* пробивной напряженностью 180—190 *кв/мм* (50 *гц*) в области температур от 50 до 80° С. Малый угол потерь полипропилена позволяет снизить потери в комбинированном диэлектрике до 0,1%, т. е. в 2 раза по сравнению с наилучшим средним значением для бумажных силовых конденсаторов. Среднее значение напряженности поля в комбинированном диэлектрике повышено на 22% по сравнению с бумажным (характерным для конденсаторов данной фирмы), причем напряженность в пленке составляет около 40 *кв/мм*, а в бумаге 16 *кв/мм*, что снижено в сравнении с напряженностью поля в бумажных конденсаторах, выпускаемых фирмой ИКАР. Удельная мощность у конденсаторов с комбинированным диэлектриком повышена на 50% по сравнению с чистобумажными конденсаторами и составляет 3,5—4 *квар/л*. Предельная реактивная мощность единичного конденсатора повышена при этом от 100 до 150 *квар*.

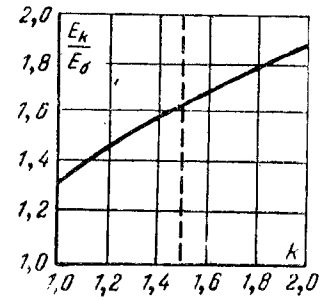


Рис. 4. Отношение напряженностей поля в комбинированном и бумажном диэлектриках в зависимости от отношения объема бумажного конденсатора к объему комбинированного.

Таким образом, в Италии более осторожно подошли к вопросу о возможности повышения удельной мощности комбинированного конденсатора и ограничили его предельную номинальную мощность; по-видимому, этим объясняется то обстоятельство, что итальянский конденсатор имеет стоимость за 1 *квар* несколько выше, чем бумажный, и фирма в своем докладе особенно подчеркивает, что потребитель должен учитывать экономию в стоимости потерь, которую он получит, используя конденсаторы нового типа.

В докладе отмечается, что диэлектрическая проницаемость полипропилена составляет 0,4 диэлектрической проницаемости бумаги, пропитанной полихлордифенилами; таким образом, отношение напряженностей $E_п/E_б = 1 : 0{,}4 = 2{,}5$. Такое же соотношение было принято в приведенных выше предварительных расчетах. Согласно данным на рис. 3 потери порядка 0,1% ($\operatorname{tg}\delta \approx 10 \cdot 10^{-4}$) соответствует величине x порядка 0,5, т. е. равенству толщин пленки и бумаги в комбинированном диэлектрике. В этом случае среднее значение напряженности поля в итальянском конденсаторе должно быть $0{,}5\,(40+16) = 0{,}5 \cdot 56 = 28$ *кв/мм*. Учитывая, что западно-европейские фирмы применяют в бумажных силовых конденсаторах значения напряженности поля несколько меньшие, чем в США и не превосходящие 17—18 *кв/мм*, получаем увеличение напряженности поля в комбинированном диэлектрике $28 : (17—18) = 1{,}55—1{,}65$, т. е. не на 22%, как указано в докладе, а на 55—65%. Это совпадает с данными расчета, показанными на рис. 4 при значении k, равном 1,5.

По-видимому, цифра 22% является ошибочной, хотя результаты наших расчетов и носят приближенный характер, так как формула (1) не учитывает наличия тонких зазоров между слоями твердого диэлектрика, заполненных пропитывающей жидкостью, которые могут привести к некоторому повышению значений ε комбинированного диэлектрика по сравнению с нашим расчетом. Возможно также, что величина x, принятая в итальянском конденсаторе, несколько отличается от выбранного нами значения 0,5, так как формула (2) также является приближенной. Все же можно полагать, что повышения напряженности на 22% не хватило бы даже для того, чтобы поддержать удельный объем конденсатора на уровне бумажного, учитывая неизбежное и достаточно заметное снижение ε_k по сравнению с $\varepsilon_б$, по-видимому, не учтенное в итальянском докладе.

Номинальное напряжение конденсатора в докладе не указано. Если предположить, что оно составляет как у американского конденсатора величину порядка 7 *кв*, то суммарная толщина диэлектрика должна быть $7 : 28 = 0{,}25$ *мм*. Можно толко догадываться о количестве последовательно соединенных секций, но если принять их число равным пяти (исходя из вероятной величины напряжения на одной секции порядка 1 *кв* или несколько выше), то толщина диэлектрика в секции будет 50 *мк*. Считая, что толщина пленки составляет 25 *мк* (как было указано в докладе при сообщении данных об ее электрической прочности), то на долю бумаги остается 25 *мк*, если принятое значение x действительно равно 0,5, что впрочем довольно вероятно. В этом случае можно представить себе диэлектрик комбинированного конденсатора в единичной его секции, как систему из двух слоев бумаги по 12,5 *мк*, между которыми проложена пленка полипропилена толщиной 25 *мк*.

Эта схема носит предположительный характер, так как весьма возможно, что в конденсаторе использована пленка меньшей толщины, чем та, для которой указывалась электрическая прочность; однако можно полагать, что схема диэлектрика должна быть построена именно так, чтобы к фольге прилегала не пленка, а бумага.

Выбор полипропилена в качестве неполярной составляющей комбинированного диэлектрика, по-видимому, вполне закономерен. Действительно полистирол, который давно уже применяется в конденсаторостроении (при изготовлении конденсаторов для электронной техники, а также иногда и как диэлектрик в силовых конденсаторах при средних частотах 1—10 *кгц*) имеет малоудовлетворительную нагревостойкость до 60—70° С (в конденсаторах); наиболее нагревостойкий политетрафторэтилен (фторопласт — 4), используемый в специальных конденсаторах при температурах до 150—200° С, чрезмерно дорог и поэтому неприемлем для силового конденсаторостроения; из известных неполярных пленочных диэлектриков остаются полиэтилен и полипропилен. Рабочая температура полиэтилена в конденсаторах доходит до 85° С, рабочая температура полипропилена — до 100° С [Л. 8]; кроме того, по-видимому, он дешевле полиэтилена [Л. 9], особенно в Италии, где этот материал был впервые получен.

Следует добиваться, чтобы и наша химическая промышленность ускорила работу по освоению производства отечественной полипропиленовой пленки, что позволило бы внедрить ее в силовое конденсаторостроение в качестве необходимой составляющей диэлектрика, позволяющей снизить потери силового конденсатора, улучшить его удельные характеристики и повысить номинальную мощность единичных конденсаторов.

Литература

1. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.

2. Морозов М. М. и Медведев С. К., Конденсаторы для силовых установок, «Электричество», 1955.

3. Варшавский Д. С., Состояние силового конденсаторостроения за рубежом, вып. 1, ВНИИЭМ, ОНТИ СНЭ, 1964.

4. Ренне В. Т., Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком, Госэнергоиздат, 1963.

5. Pole tyre power capaciter, Transmission and distribution, 1965, vol. 17, № 12.

6. Лысков Ю. И., Конденсатор мощностью 400 *квар* в США, «Энергохозяйство за рубежом», 1967, № 2.

7. Giannini Mochi E., Zanobetti D., Isotactic polypropylene film for new power capacitors, GIGRE—CE 18, 1967/67/2.

8. Protospataro F., Prove di vita su condensatori in Moplefan, Materie Plastiche ed elastomeri, 1963, № 9.

9. Свойства полипропилена и переработка его литьем под давлением, «Химия и технология полимеров», 1960, № 12.

[24.11.1967]

✧ ✧ ✧

УДК 621.319.4:621.315.614.6:621.315.616.9

По поводу статьи В. Т. Ренне «Силовые конденсаторы с комбинированным диэлектриком»

(«Электричество», 1968, № 5)

Я прочитал с большим интересом статью проф. В. Т. Ренне по силовым конденсаторам с комбинированным диэлектриком. Приведенная им информация о конденсаторах с диэлектриком из бумаги и изотактической полипропиленовой пленки, изготовленных в Италии фирмой ИКАР и пропитанных полихлордифенилом, правильна, но мне хотелось бы ее несколько дополнить. Комбинация, которая в настоящее время определена как оптимальная, включает применение пропитки трихлордифенилом, а отношение диэлектрических проницаемостей пропитанной бумаги и полипропилена весьма близко к 2,8; эта величина соответственно определяет и отношение рабочих напряженностей электрического поля в этих двух диэлектриках.

Объем диэлектрика снижается в соответствии с коэффициентом:

$$k=1:[1+x(\varepsilon_1/\varepsilon_2-1)],$$

но уменьшение объема корпуса конденсатора будет, конечно, несколько иным.

Например, при $x=0{,}75$, т. е. при объеме полипропилена в 3 раза большем объема бумаги, снижение объема диэлектрика составляет 0,43, в то время как снижение объема конденсатора в целом менее явно выражено и значение k должно быть принято порядка 0,67. Поэтому конденсаторы мощностью 100 и 150 *квар* могут иметь тот же корпус, что и конденсаторы мощностью 66,7 и 100 *квар* соответственно.

Проф. В. Т. Ренне прав в том, что «эквивалентная» напряженность в конденсаторе с комбинированным диэлектриком повышена более чем на 22% по сравнению с обычным бумажным конденсатором. В докладе моем и Джианини Моки, представленном на СИГРЭ в 1967 г., увеличение на 22% было указано, как то увеличение, которое потребовалось бы для получения с чисто бумажным диэлектриком того же значения мощности, которое дает комбинированный диэлектрик. По существу представление об «эквивалентном» значении напряженности не очень полезно и лучше использовать значение напряженности поля в бумаге (которое является лимитирующим параметром); напряженность в полипропилене связана с этим значением через постоянный коэффициент.

Изотактическая полипропиленовая пленка поставляется различных толщин; обычные пределы — от 10 до 25 *мкм*.

Следует выбирать толщину бумаги и полипропилена в соответствии с номинальным напряжением конденсатора, учитывая, что в настоящее время напряжение, приходящееся на одну конденсаторную секцию, не должно превышать скажем 3 000 *в*.

В заключение разрешите мне выразить удовлетворение тем, что проф. В. Т. Ренне разделяет нашу уверенность в перспективности этого нового типа силового конденсатора.

Проф. Дино Дзанобетти

Болонский Университет, Италия